

투수성 아스팔트포장 구조설계방법에 관한 연구

A Study on the Structural Design of Permeable Asphalt Pavement

이수형 Lee, Soo Hyung
유인균 Yoo, In Kyoon
김제원 Kim, Je Won

정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : shlee1@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : ikyoo@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 전임연구원 (E-mail : jewonkim@kict.re.kr)

ABSTRACT

The porous pavement system is widely considered very effective in urban street because of its various benefits on safety and environment, but the pavement thickness design system has not been established yet. In porous pavement system, rainwater penetrates to the subgrade through porous pavements layers. Porous pavements are expected to reduce or alleviate the problems caused by impermeable pavement layer such as flood damage due to heavy rain in the city, drainage load, disorder in ecosystem, and heat island. However, its structural design methods in traffic roads has not been made mainly because of not being able to consider adequately the effect of rainwater on subgrade strength. In this study, structural design method of porous pavements is suggested after considering the subgrade weakness due to rainwater and numerical mechanical analysis. It is noted that elastic modulus of subgrade is reduced by 20% as subgrade moisture content is increased by 2% at optimum moisture content in the literature review. As a result of both finite element analysis and strength loss of subgrade by the existing design method, it is necessary to increase subbase thickness about 30cm in porous pavements compared with the existing traffic road pavement system. It is similar to premium thickness of structural design of porous pavements in Japan.

KEYWORDS

porous asphalt pavement, structural design, heat island, urban flood

요지

도시부 도로에서 투수성포장의 효용성은 널리 인식되고 있으나, 빗물침투로 인한 노상의 약화를 고려한 포장 두께 설계는 아직 제시되지 못하고 있다. 도시에서 빗물을 도로포장의 표면에서 바로 배수시키지 않고, 표면을 투과해서 노상으로 침투시키는 구조를 갖는 투수성포장은 도시홍수의 억제, 배수시설의 부하 경감, 지중생태계 개선, 열섬현상 억제 등 기존 불투수성 포장으로 인해 발생하는 여러 가지 문제를 저감시킬 수 있을 것으로 기대되고 있다. 그러나 투수성포장의 구조설계는 빗물 침투로 노상이 약화되는 현상을 적절히 고려할 수 없어, 투수성포장에 대한 구조설계방법은 아직 제시되지 못하고 있다. 본 연구에서는 빗물에 의한 노상의 약화 정도에 대한 문헌적 정보와 역학적 분석을 통해 잠정적으로 적용할 수 있는 투수성 아스팔트포장의 구조설계방법을 제시하였다. 문헌적 정보는 노상함수비가 최적함수비에서 2% 증가에 따라 탄성계수가 20% 감소한다는 조건을 적용하였다. 실제 현장을 대상으로 투수성포장을 적용할 경우 유한요소 해석결과와 기존 설계방법에 노상의 강도저하를 고려한 결과 기존두께에 30cm 정도 보조기층을 보강해야 하는 것으로 분석되었다. 이것은 일본에서 투수성 아스팔트포장의 구조설계에 적용하고 있는 증가두께와 유사한 것으로 나타났다.

핵심용어

투수성 아스팔트포장, 포장구조설계, 열섬현상, 도시홍수

1. 서론

도로는 사람과 물자를 안전하고 효율적으로 이동시키기 위한 중요한 육상교통시설이다. 오늘날까지의 도로

포장은 비용이 저렴하면서도 내구성이 뛰어난 아스팔트와 시멘트 콘크리트가 주로 사용되고 있다. 그러나 급속한 산업화와 도시화에 따라 도시지역에서 불투수성의

도로 포장면의 비율이 증가하면서, 강우가 배수구를 통해 신속히 배수됨으로써 도시 홍수를 발생시키고, 강우의 지표면 침투 저하로 인한 지하수위의 저하와 용수의 고갈 등 생태계의 불균형을 초래하고 있으며 도시지역의 열섬현상과 같은 환경문제를 발생시키고 있다.

이러한 문제를 해결하거나 완화시키기 위하여 빗물을 포장의 표면을 침투해 직접 노상으로 침투시키는 투수성포장을 적용하고 있으며 현재 하층이 크게 작용하지 않는 광장, 주차장 및 보도, 자전거 포장에 주로 이용되고 있다. 투수성포장은 빗물이 노상으로 직접 침투하기 때문에, 우수 침투로 인해 노상이 약화되는 것을 우려하여 차도에는 아직 적용되지 못하고 있다.

본 연구에서는 투수성 아스팔트포장의 구조설계를 위하여 물의 침투로 인한 노상 지지력 약화 정도를 문헌을 통해 평가하고, 이를 근거로 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 구조적 안정성을 확보할 수 있는 투수성 아스팔트포장의 구조설계방법을 제시하고자 한다. 또한 기존 포장두께 설계 개념에서 노상의 지지력 저하에 따른 포장두께를 평가하고, 일본의 투수성포장 설계방법과 비교분석하고자 한다.

2. 국내외 연구사례

2.1. 일본의 투수성포장 연구사례

자동차 도로에 투수성포장을 적용한 연구사례는 주로 일본에서 진행되고 있다. 일본의 요시나카(吉中) 등(2000)은 투수성포장의 중교통 구간에 대한 적용성을 평가하기 위해 두께 45cm의 시험시공을 실시하고 현장 시험을 실시한 결과 시험시공 구간에서 살수 전·후의 FWD 장비를 이용한 처짐량과 동적 평판재하시험기를 이용한 노상의 지지력 측정 결과 빗물 침투가 투수성포장의 구조적인 내구성에 미치는 영향은 미미하다고 보고하였다.

일본의 나카니시(中西) 등(2002)은 소규모 시험포장을 실시하여 물에 의한 노상의 약화현상을 평가하였다. 이들은 그림 1과 같이 노상 구간, 노상위에 보조기층 20cm 설치한 구간 그리고 노상위에 15cm의 필터 층을 두고 보조기층 20cm를 설치한 구간으로 이렇게 3구간에 대하여 강우 7일 후, 강우 직후 그리고 강우 7일 후에 평판 반복재하시험을 실시하였다. 그 결과는 노상 구간과 노상위에 보조기층 20cm를 설치한 구간은 배수가 되지 않으면 지지력이 절반이하로 떨어질 수 있으며 그러나 필터 층을 두고 35cm를 넘어가면 지지력에 차이

가 거의 없다고 보고하였다. 이것은 구속응력과 필터층의 배수효과를 동시에 평가한 것으로 판단된다. 노상위에 포장층이 두꺼워서 노상의 구속응력이 커질수록 또 배수를 신속히 시킬수록 지지력은 영향을 덜 받게 된다.

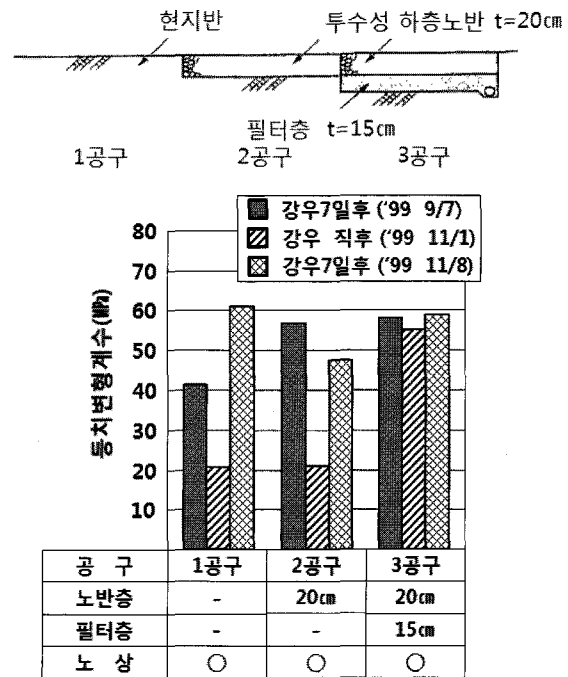


그림 1. 우수 침투에 따른 지지력의 변화(中西弘光, 2002)

또한 일본의 엔도(遠藤) 등(2002)은 차도용 투수성포장에 대한 연구에서 노상토의 실내실험과 현장과의 경향을 파악하기 위해 시험포장을 실시하였다. 현장에서 FWD를 이용하여 노상의 지지력을 평가한 결과 강우 후에 노상토의 함수비가 증가한 시점에서 FWD의 처짐량은 약간 크게 측정되었으나, 이 결과로부터 추정된 노상의 탄성계수는 거의 변화가 보이지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 실내실험 결과 노상의 함수비가 올라가면 노상토의 회복탄성계수가 떨어지고, 재하에 의한 공시체의 영구변형이 크게 되는 결과를 얻었다고 보고하였다. 또 다른 연구에서 일본의 엔도(遠藤)(2002)와 요시나카(吉中)(2000)는 강우로 인한 투수성포장의 지지력저하를 FWD로 측정해본 결과 그 차이가 미미하다고 보고 하였으나 없는 것은 아니라고 보고하였다.

일본에서의 연구사례를 종합해 보면 노상이 포화되면 지지력은 저하될 수 있으며 포장 층이 두꺼워져서 구속응력이 증가하면 지지력이 감소하며 노상의 투수계수가 크면 지지력은 영향을 덜 받는 것으로 요약할 수 있다. 그러나 노상의 함수비는 얼마나 변할 수 있는 것인지 이 것으로 인하여 지지력이 얼마나 저하될 수 있는지 평가

하기는 어려운 상황이어서 이에 대한 이론적인 검토가 필요하다고 판단된다.

2.2. 노상 함수비 변화에 따른 역학적 특성

투수성포장은 우수가 노상에 침투되는 구조이기 때문에 노상 지지력 약화를 예상할 수 있다. 우수 침투로 인하여 노상의 지지력이 어느 정도 약화되는지를 파악하는 것은 투수성포장의 단면을 설계하기 위해서는 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다. 본 장에서는 노상의 특성을 평가하는 CBR시험의 원리를 통해 노상이 포화되었을 때 함수비가 어떻게 변동될 수 있는지 또 그 함수비 변화에 따라 노상의 역학적 특성이 어떻게 변동될 수 있는지 국내의 문헌을 통해 고찰하기로 한다.

2.2.1. 노상의 다짐과 관리

노상(Subgrade)은 포장시스템의 기초역할을 하며, 표면에 작용하는 모든 하중을 최종적으로 지지하고 하중을 분산하는 부분이다. 노상은 상부의 다층 구조 시스템의 포장을 통하여 전달되는 하중에 의해서 노상에 과잉변형 또는 변위를 일으키지 않는 최적 지지조건을 제공할 수 있어야 한다. 노상은 흙 쌓기 부분에 있어서는 토공의 마무리 면에서, 땅깍기부에 있어서는 굴착 마무리 면에서 아래로 약 1m부분이 이에 해당된다. 노상에는 해로운 동결작용의 영향을 완화하기 위하여 동상방지층을, 또는 노상의 세립토사가 보조기층에 침입하는 것을 방지하기 위하여 차단층을 설치할 수 있다. 노상의 마무리 면을 노상면이라 부른다.

포장의 공용성은 노상토의 상태와 물성에 직접 관계되기 때문에, 적절한 실내시험에 의해서 얻어지는 노상토의 강도지수(CBR값, M_R 값 등)를 기준으로 포장 각층의 두께를 결정하고 시공 품질관리를 통하여 소요의 다짐 및 재료시방기준을 만족하여야 한다. 노상의 재료는 다짐을 통해 공학적 특성을 개량할 수 있으며 다짐은 정적이나 동적인 방법으로 흙 속의 공기량을 감소시키고 흙 입자간의 거리를 근접시켜 흙의 밀도를 증가시키는 작업을 말한다. 다짐시험은 Proctor(1936)가 제시한 방법이 국제적으로 표준화되어 있으며, 우리나라에서도 이를 근간으로 한국산업규격 KS F 2312에 규정되어 있다.

다짐시험에서 함수비에 따른 건조단위중량을 표시한 곡선을 다짐곡선이라 한다(그림 2). 대체로 건조단위중량은 특정한 함수비에서 최대가 되며 그보다 작거나 큰 함수비에서는 건조단위중량이 작으므로 다짐곡선의 모

양은 완만한 산봉우리 모양이 된다. 이때 최대 건조단위중량이 발견되는 함수비를 최적함수비라 하며 현장에서는 함수비를 조절하며 최대 건조밀도의 95% 이상을 목표로 다짐작업을 시행하게 된다. 그림 2에서 영공극곡선은 공극이 물로 포화되었을 때의 함수비와 밀도를 나타내는 곡선이며 최적함수비와 최대함수비 사이의 차이는 95% 다짐도에서 2~3%의 범위에 있다. 따라서 물로 포화가 된다하더라도 최적함수비보다 함수비가 약간 증가하는 것이다.

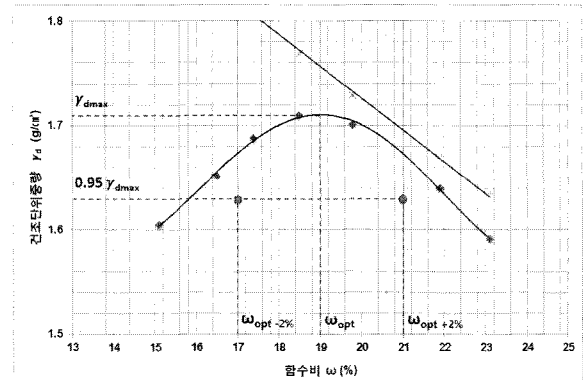


그림 2. 흙의 다짐곡선

CBR(California Bearing Ratio)은 1928년 미국의 O. J. Porter가 아스팔트포장의 파손을 조사할 때, 포장 재료의 지지특성을 간단히 비교하기 위해 고안한 척도를 말한다. 비교를 위한 표준 척도로서 대표적인 쇠석(crusher-run)이 다져진 상태의 지지력을 100%로 설정하고 그 비율에 따라 CBR값을 정하도록 한 것이다. 그 후 1940년 미 공병단에서는 A. Casagrande, T. A. Middlebrook 및 O. J. Porter를 자문위원으로 하여 CBR시험법을 규정하였으며 1942년 일부 수정되어 현재까지 사용되고 있다.

CBR 평가를 위한 재료는 다짐 시험에서 사용된 다짐 몰드에 최적함수비로 다진 후, 4일간 수침시킨 후에 관입시험을 통해 지지력 값을 얻고 쇠석의 지지력과 비교하여 해당 CBR값을 구하게 된다. 다져진 공시체를 4일간 물에 수침시키는 것은 현장에서 예상되는 최악의 조건을 실험실에서 재현하기 위함이다(유인균, 1988). 따라서 CBR값은 이미 포화된 상태에서의 강도저하를 고려한 지지력 지수이므로 이를 이용한 탄성계수를 고려할 때는 이미 포화로 인한 강도 저하를 고려한 것이 된다.

2.2.2. 국내 노상 지지력 연구사례

우리나라에서 노상의 지지력에 대해서 연구를 시작한

것은 1980년대 후반이다. 미국에서 1976년 발간된 AASHTO 포장설계 잠정지침을 국내에 적용해 오면서, 실내 다짐시험이 수정 다짐시험으로 다짐에너지가 증가되어 그 적용방안에 대한 연구가 시작되었다. 그 후 1986년 AASHTO 포장설계법이 발표되었고 이를 실무에 적용하기 위해서는 노상재료에 대한 동탄성계수(Resilient Modulus)를 필요로 하여 이에 대한 연구가 진행되었으나 포장 설계법에 반영되지는 못하였다. 건설교통부(2002)의 한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구에서 다시 한 번 검토되었다.

한국도로공사(1994)에 따르면 우리나라 고속도로에서 노상의 함수비 변화를 관측한 결과 그 변화폭이 2.5~4.0% 범위에 있는 것으로 조사되었다. 또한 건설교통부(2002)에 따르면 국내에 사용되는 노상재료는 대부분 모래 또는 실트질 모래로 나타났으며 노상토 특성으로는 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있다고 기술하고 있다.

권기철(2006)은 국내에서 사용되는 일반적인 노상토를 사용하여 국내 노상토의 함수비 변화(한국도로공사, 1994)를 반영하여 최적함수비와 최적함수비±2%의 함수비 변화에 대한 역학실험을 수행하였다. 그 결과 사용된 노상토 재료에 대하여 최적함수비 조건에서의 탄성계수 값에 비하여, 함수비가 2% 증가하면 평균 23% 감소하였으며, 함수비가 2% 감소하면 평균 20% 증가하는 것으로 나타났다.

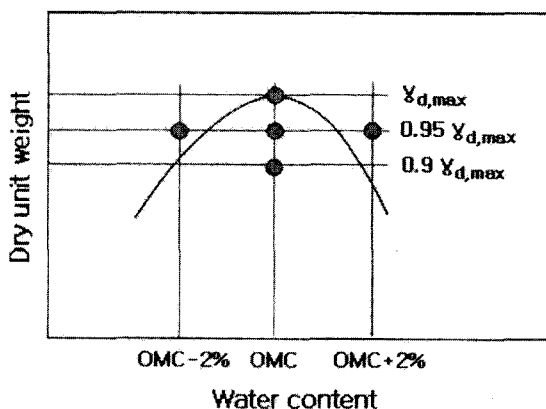


그림 3. 시험에 사용된 시편의 건조단위중량 및 함수비 조건 (권기철, 2006)

국내 노상토의 함수비 변화는 2.5~4.0%로 나타난 것은 앞서 검토했듯이 최적함수비와 최대함수비의 차이가 크지 않다는 것을 의미하며 함수비가 급격하게 갑자기 증가할 수가 없다는 것을 의미한다. 물론 토질에 따라서 달라지겠지만 국내에서 사용되고 있는 노상재료에 대하여 포화로 인한 함수비증가에 대하여 탄성계수 값이

23% 정도 감소한다고 정리될 수 있다. 따라서 현재의 규격대로 설계되고 시공된 노상조건이라면 물의 침투와 포화로 인한 탄성계수의 변화는 예측가능하고, 제한적인 범위 내에서 변동한다는 것을 의미하며, 이를 이용하면 포장의 두께 설계가 가능하다는 것을 알 수 있다.

3. 현재 아스팔트포장 두께 설계 방법

미국에서 개발된 AASHTO 설계법을 일본에서는 T_A 설계법으로 변형하여 사용하고 있으며 우리나라에서는 이 두 가지 설계법이 같이 사용되고 있다. 각 설계법의 특징과 노상강도의 차이가 포장의 두께 설계에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보기로 한다.

3.1. AASHTO 설계법

AASHTO 포장설계법은 미국 주도로 교통공무원협회(American Association of State Highway and Transportation Officials)에 의해 제안된 것으로 1958년부터 1961년까지 수행된 도로시험 결과를 토대로 1972년에 포장구조 설계를 위한 잠정지침을 발행하였으며 1986년에 완성하였다. 1986 AASHTO 설계법에서의 큰 변경사항은 노상토의 지지력 측정을 위하여 회복탄성계수(M_R)를 도입하였고 설계변수들에 대한 신뢰도, 배수계수의 도입, 팽창 및 동결에 의한 영향 고려 등을 들 수 있다. 국내에서는 1986 AASHTO 설계법에 도입된 사항을 적용하기 어렵다는 이유로 1972년 제정된 잠정지침을 지금까지 적용하고 있다.

AASHTO 설계법의 커다란 성과 중의 하나는 포장의 서비스 질을 표시하는 서비스수준을 정량적으로 설정하였다는 점이다. 이러한 서비스수준의 도입을 통해 포장설계의 분명한 목표를 설정할 수 있게 되었다. 또한 AASHTO 도로시험에서는 트럭하중을 이용하고 다양한 차량의 하중에 따른 영향을 고려하기 위하여 8.2톤 환산축하중 개념을 도입하였다. 따라서 모든 중량의 차량은 환산축하중의 통과횟수로 환산된다. 포장의 구조적인 성능에 대해서는 구조지수(Structural Number; SN) 개념을 도입하였다.

이제 동일한 노상지지력 위에 다양한 두께의 포장을 시공한 후에 지속적으로 트럭하중을 통과시키며 노면의 파손상태를 관찰한다. 포장의 파손이라고 판단할 수 있는 하나의 서비스수준을 설정하면 이 상태에 도달하기까지 다양한 포장두께에 따라 다양한 8.2톤 환산축하중이 산정된다. 즉, 시험포장의 노상위에 일정한 두께의

포장을 건설하고 몇 대의 환산축하중이 통과하면 최종 서비스수준에 도달한다는 것을 예측할 수 있게 된 것이다. 위와 같이 최종 서비스수준, 구조지수 그리고 환산축하중 통과량 사이의 정량적인 관계를 구축한 것이다.

AASHTO 도로시험의 한계는 한 가지 노상지지력으로 시험이 실시되었다는 점이다. 기본적으로 도로포장의 두께는 일정한 수명을 갖기 위해서는 노상의 지지력에 따라 변해야 한다. 즉 동일한 수명을 갖기 위해서는 노상의 지지력이 약하면 포장의 두께는 증가해야 하고 노상의 조건이 강하면 두께가 감소하게 된다. 또한 기후 조건에 따라 포장의 수명이 달라진다. 즉, 동일한 포장 구조라 하더라도 비가 많이 오는 지역보다 건조한 지역에서의 포장의 수명이 길어진다. 이렇게 노상강도의 변화와 지역특성을 설계에 반영하기 위해서 노상지지력계수(SSV; Soil Support Value)와 지역계수(Rf; Resonal factor)를 도입하였다. 이것을 방정식으로 표현한 것이 식 (1)이며, 포장두께를 손쉽게 구할 수 있도록 작성된 도표가 그림 4이다.

$$\log_{10}(W_{s2}) = 9.36 \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log \frac{4.2 - P_f}{4.2 - 1.5}}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + \log_{10}\left(\frac{1}{R_f}\right) + 0.372(SSV - 3.0) \quad (1)$$

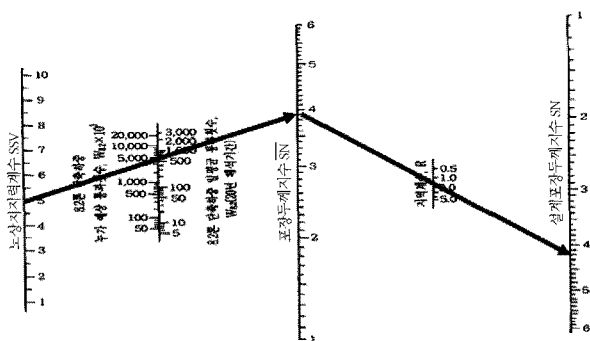


그림 4. 아스팔트포장 구조설계 도표

도로포장의 구조는 층으로 구성되므로 층별 개념에 의하여 각 층별 공법, 재료, 품질규격에 따라 층별두께를 결정한다. 먼저 노상면에서 필요한 SN치를 기본 설계식 또는 적용 도표를 이용하여 산정하고 동일한 방법으로 각층의 재료에 맞는 지지력계수를 이용하여 보조기층과 기층에 필요한 SN치를 산정한다. 이와 같은 방법으로 다른 층의 소요 SN치를 결정하고 각층의 두께는 각층의 소요 재료의 상대강도계수를 고려하여 결정한다.

앞에서도 언급된 바와 같이 AASHTO 설계법의 가장

큰 장점은 포장의 서비스수준을 정량화하고 이를 포장의 구조와 교통량과의 관계를 설정하였다는 점이다. 그러나 변동성이 큰 환경과 재료로 구성되는 포장시스템에서 이들 관계를 정확히 예측한다는 것은 매우 어려운 일이다. 미국의 국가 연구위원회에서는 AASHTO 설계 방정식을 평가한 결과, 포장이 파손에 도달하는 교통량에 대한 예측치와 실제 데이터를 분석한 결과 조사구간의 약 절반이 100배 이상의 차이를 나타내었고(National Research Council, 1994), 이를 개선하고자 노상 지지력의 변화, 배수계수의 도입 및 동결에 의한 영향을 고려하고자 시도하였으나 그 과정이 복잡하여 국내에는 도입되지 못하고 있는 실정이다.

그럼에도 불구하고 국내에서는 거의 모든 도로가 AASHTO 설계법에 따라 설계되고 시공되어 운영되고 있다. 즉 여러 가지 불확실성이 많이 포함되어 있음에도 불구하고 실무에 적용할 수 있는 최소한의 요건은 충족시켜주고 있다는 의미로 볼 수 있다. 우리나라에서 이 설계법으로 포장을 설계하면 실무적으로 큰 문제가 없는 것으로 검증되었다고 볼 수 있다. 포장 설계법의 신뢰성을 높이는 데는 비용이 많이 소요되므로 비용을 고려하면서 설계법의 신뢰성을 높여갈 필요가 있다.

3.2. T_A 설계법

일본에서는 일본도로협회에서 발행한 “아스팔트포장요강”에 T_A 설계법을 제시하고 있으며, 이 방법은 AASHTO 설계법과 전체적인 구조가 유사하며, 몇 가지 변수를 단순화한 것으로 볼 수 있다. 포장의 수명을 나타낼 수 있는 서비스수준을 명시하지 않으며, 교통량을 대형차 하루 교통량을 변수로 하고 있다. 노상의 지지력은 CBR로 하며, 포장의 전체 소요두께를 아스팔트 표층 두께로 환산한 두께 즉 T_A(Total Asphalt Thickness)로 구조지수인 SN을 대신하여 사용하고 있다. 이 세 가지 변수에 대한 관계를 아래 식과 같이 표현하고 있다.

$$T_A = \frac{3.84N^{0.16}}{CBR^{0.3}} \quad (2)$$

앞서 설명한 바와 같이 일본의 T_A 설계법은 미국의 AASHTO 설계법을 실용적으로 변형한 것이다. 즉, 포장의 최종 서비스수준이라는 개념을 제거하여 포장의 궁극적인 목적에 대한 논란을 제거하였다. 교통하중에 대해서는 일본에서 주로 운행하는 5톤 운하중의 통과횟수를 이용해 그룹을 지어 A, B, C, D 및 E 교통으로 구

분하고 필요할 경우 통과횟수로도 환산할 수 있도록 하였다. 노상의 지지력에 대해서는 노상의 CBR값을 바로 적용할 수 있도록 하였으며 구조지수 SN은 아스팔트 표층의 상대강도계수를 1로 정함으로써 T_A 는 아스팔트 표층두께로 환산한 총 두께가 되는 개념이다.

미국의 AASHTO 설계법에 비해 일본 T_A 설계법의 큰 차이는 포장의 수명을 나타내는 최종 서비스수준의 개념을 제외시킨 것이다. 이것은 포장설계의 신뢰성 평가에 중요한 문제이다. 미국의 AASHTO 설계법은 최종 서비스수준을 지정하고 통과한 교통량을 비교하든가, 통과한 교통량에 대한 서비스지수의 변화를 비교하든가 그 설계법의 신뢰성을 평가할 수 있지만, 일본의 T_A 설계법은 정량적인 최종 상태를 정의하지 않았기 때문에 그의 신뢰성을 평가하기가 불가능하다.

도로포장은 현장에서의 재료의 변화가 심하고 주변 여건의 변화 그리고 교통량을 정확하게 예측하기가 어렵다는 사실을 내재적으로 가지고 있다. 이렇게 불확실성이 많이 포함된다면 포장의 최종 결과인 노면의 상태에도 당연히 불확실성을 많이 내포하게 된다. 조기에 파손되는 등 실용적으로 문제가 없는 적절한 단면을 제공해 준다면 큰 문제가 없다고 보는 것이다.

4. 투수성포장 두께 설계

일반 아스팔트포장과 투수성포장의 큰 차이점은 투수성포장은 포장체 내로 빗물이 침투된다는 점이다. 즉, 표층과 기층의 아스팔트 혼합물을 다공성으로 구성하여 물을 침투시킨다. 입상재료로 구성되는 기층이나 보조기층의 경우에는 물의 영향을 받지 않는 재료를 이용하기 때문에 물의 침투로 큰 영향을 받지 않으나 세립분이 많이 포함된 노상의 경우에는 빗물의 침투로 강도의 약화가 우려된다. 따라서 다공성 아스팔트 표층과 기층이 역학적으로 문제가 없다는 전제 하에 빗물로 인한 노상의 약화를 고려한 투수성포장의 두께 설계가 가능하다.

본 연구에서는 LH공사에서 시행한 택지개발사업지구 분석 대상으로 선정하였으며, 포장의 구조 설계법으로는 지금까지 큰 문제없이 사용되고 있는 AASHTO 설계법과 T_A 설계법 그리고 유한요소법에 의한 구조 해석적 두께 설계를 실행하고 비교하기로 한다.

4.1. 유한요소 해석을 이용한 두께 설계

유한요소 해석은 아스팔트포장 단면의 역학적 해석을 위해 적용하였다. 먼저 불투수성 포장인 밀입도 아스팔트

트포장의 단면에 대해서 표면에 유효중이 가해졌을 때의 변위량을 구하고, 투수성포장으로 적용할 경우 물의 침투로 노상지지력의 약화에 따른 노상의 변위량 증가를 평가하여, 이 변위량 증가를 상쇄시킬 수 있는 포장의 증가두께를 분석하였다.

유한요소 해석 모델은 2차원 모델을 이용하였다. 2차원 유한요소 해석 모델은 3차원 모델에 비해 실제 아스팔트포장의 거동 특성에서 일어나는 비선형 재료의 영향, 차량의 이동속도의 영향에 따른 거동 특성 분석에는 제한이 있지만 해석시간이 짧은 장점을 가지고 있다. LH공사의 택지개발사업 실시보고서에 따르면 단지내 아스팔트포장 도로는 교통량에 따라 광로, 대로, 중로, 소로로 구분되며 본 연구에서는 광로와 대로를 대상으로 분석하였다.

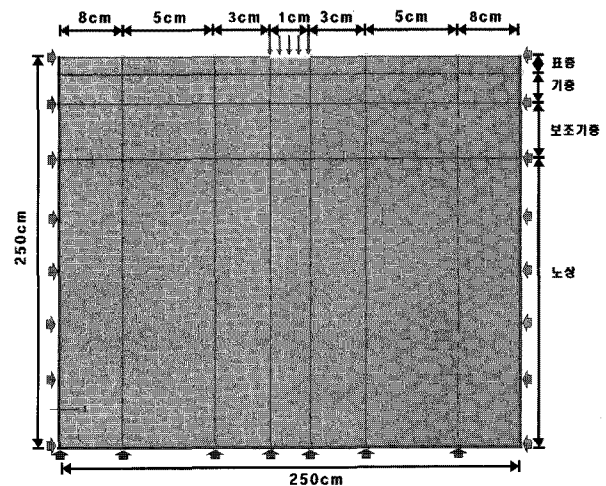


그림 5. 유한요소 해석 모델의 하중 및 경계조건

4.1.1. 유한요소 해석 입력변수

유한요소 해석을 위해서는 포장재료의 물성과 두께 그리고 하중조건 등의 입력변수를 설정하여야 한다. 아스팔트포장의 유한요소 해석에 따른 포장의 거동 해석을 위한 기본 입력변수는 탄성계수와 포아송비이다. 포장 단면의 구조는 표층, 기층, 보조기층 그리고 노상으로 구분하였으며 중간층은 물성이 표층과 유사하므로 표층에 포함시켰다. LH공사에서 제시하는 택지개발사업지구의 포장두께는 표 1과 같다.

일반적으로 아스팔트포장 도로에 사용되는 각 층의 재료에 대한 탄성계수의 범위는 표층의 경우 $10,000\text{kg/cm}^2 \sim 70,000\text{kg/cm}^2$, 아스팔트 안정처리 기층의 경우 $4,000\text{kg/cm}^2 \sim 40,000\text{kg/cm}^2$, 보조기층의 경우 $1,000\text{kg/cm}^2 \sim 5,000\text{kg/cm}^2$, 노상의 경우

500kg/cm²~3,000kg/cm²이다(최준성, 1999). 본 연구에서는 아스팔트포장 도로의 표층과 기층의 탄성계수는 위에 제시된 탄성계수 범위의 중간값을 사용하여 유한요소 해석 입력변수로 사용하였으며 포아송비는 실험을 통하여 결정하기 매우 까다로울 뿐만 아니라 포장 구조 해석에 큰 영향을 미치지 않는다(건설교통부, 2007). 따라서 일반적으로 사용되는 포아송비를 사용하였으며 표 2에 정리하였다. 하중조건은 차량의 운하중이 포장 표면에 가해지는 접지압을 기준으로 하였으며 표 3에 정리하였다. 차종은 도로교통량 통계연보의 차종 분류 체계를 사용하였다.

표 1. 택지개발사업지구 설계포장두께(cm)

구 분	광로	대로1류	대로2류	대로3류
표 층	5	5	5	5
중간층	6	6	6	6
기 층	19	18	17	20
보조기층	35	41	37	39

표 2. 해석에 사용된 재료물성

구 분	탄성계수(MPa)	포아송비
표 층	3432	0.3
기 층	2157	0.3
보조기층	517	0.35
노 상	68	0.4

표 3. 차종별 전체 접지압 및 접지 면적

구 분	차종	대표타이어규격	전체접지면적 (cm ²)	전체 접지압력 (kg/cm ²)
소로	1종	195/65R15	243.6	2.55
중로	3종	11R22.5-16PR	596	6.44
대로	5종	11.00×20-16PR	644	7.10

적용되는 차종에 대해서는 도로구분에 따라 적용되는 하중을 표 3에서와 같이 1종, 3종, 5종으로 구분하였으며 자동차 통계연보에 따라 대표타이어의 규격, 전체 접지면적 그리고 전체 접지압력을 구하였다.

4.1.2. 유한요소 해석 결과

택지개발사업 실시 설계보고서의 밀입도 아스팔트포장 단면 구조와 문헌 연구를 통하여 살펴본 타이어 접지압 및 폭을 구현한 2차원 해석모델을 이용하여 도로별 하중재하 지점의 최대 변위량을 분석하였으며 표 4에 분석결과를 나타내었다. 투수성포장을 차도에 적용함으로써 우려되는 빗물의 노상 침투에 따른 노상 연약화의 영

향을 살펴보기 위하여 노상 지지력을 기존 단면의 탄성계수에 비하여 5%씩 감소시키며 최대 20%까지 노상의 탄성계수를 감소시키며 노상의 발생 변위량을 분석하였다. 노상의 지지력이 감소함에 따라 노상의 발생 변위는 증가하였으며 밀입도 아스팔트포장을 적용한 경우의 노상 변위량에 비해 19%의 변위증가율을 나타내었다.

표 4. 노상지지력 감소에 따른 노상 변위량(mm)

구 분	노상 지지력 감소율(%)					변위량 증가율(%)
	0	5	10	15	20	
광 로	1.57	1.66	1.74	1.82	1.95	19.03
대로1류	1.52	1.61	1.68	1.76	1.88	19.38
대로2류	1.58	1.67	1.74	1.83	1.95	19.26
대로3류	1.51	1.60	1.67	1.76	1.88	19.42

노상의 지지력이 약화되면 노상의 변위량은 증가한다. 따라서 노상의 지지력을 밀입도 아스팔트포장의 노상 지지력과 동일한 수준으로 확보하기 위해서는 포장두께를 증가시켜야 한다. 본 연구에서는 보조기층의 두께를 증가시켜 밀입도 아스팔트포장의 노상 변위량과 동일한 변위를 나타낼 수 있는 포장두께를 분석하였으며 그 결과를 표 5에 나타내었다. 노상의 지지력이 5% 감소하였을 경우 광로 단면에서 보조기층의 두께를 최대 10cm 증가해야 밀입도 아스팔트포장과 동일한 변위량을 나타내는 것으로 분석되었으며 노상의 지지력이 20% 감소하였을 경우 보조기층의 증가두께는 광로 단면에서 최대 32cm, 대로 단면에서 최대 31cm로 분석되었다.

표 5. 보조기층 증가두께(cm)

지지력감소율(%)	광 로	대로1류	대로2류	대로3류
5	10	8	8	9
10	15	15	15	15
15	22	22	21	22
20	32	31	31	31

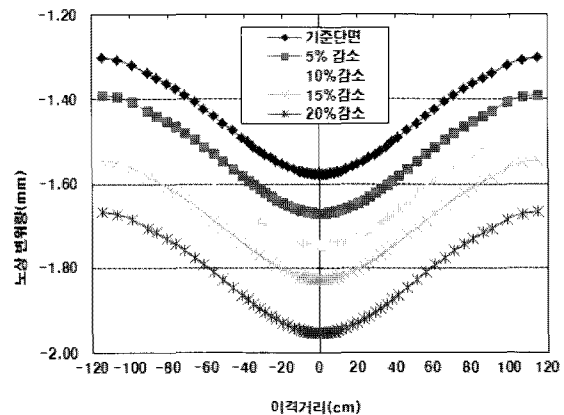


그림 6. 지지력 변화에 따른 광로 노상 변위량

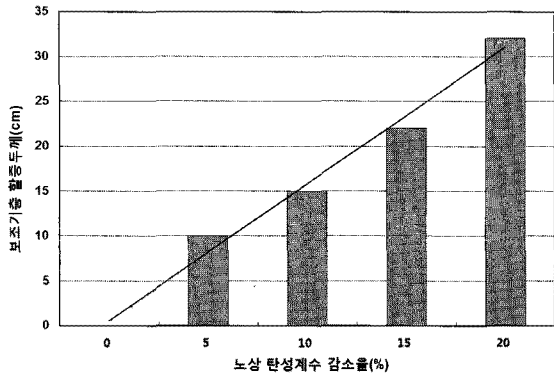


그림 7. 탄성계수 변화에 따른 광로 보조기층 증가 두께

노상의 지지력이 20% 저하되었다고 가정하고 두께를 설계하는 것은 노상이 일 년 내내 포화되어 있다는 가정도 포함된다. 포장층을 구성하는 표층, 기층 그리고 보조기층이 제 기능을 하기만 한다면 가장 안전 측의 단면이 된다. 즉, 투수성 아스팔트포장의 가장 안전 측인 최대 두께로서의 의미를 갖는다.

4.2. 아스팔트포장 설계법을 이용한 두께 설계

현재 국내에서 사용되고 있는 AASHTO 설계법과 T_A 설계법의 설계개념으로 노상의 지지력이 약화된다는 가정에 따라 노상의 약화 정도에 따른 보강 두께를 분석하였다. 즉, 현재의 설계 방법을 이용하여 노상의 지지력을 평가하는 CBR 값이 우수 침투로 인하여 저하한다는 가정으로 노상지지력의 약화에 따른 포장의 증가두께를 분석하였다. 본 분석도 유한요소 해석과 마찬가지로 택지개발사업지구의 광로와 대로를 대상으로 분석하였다.

4.2.1. 현재 설계법을 이용한 설계 개념

현재 국내에서 포장설계법은 AASHTO 설계법과 T_A 설계법이 적용되고 있다. 두 설계법이 설계방법은 다르지만 기본 개념은 교통하중과 노상의 상태에 따라 구성되는 각종 재료의 강도를 고려하여 노상에서 요구되는 지지력을 확보할 수 있는 두께를 결정하는 것이다. 포장구조설계에 있어 노상의 지지력은 대부분의 경우 설계 CBR로 평가한다. 포장 재료별 강도는 AASHTO 설계법은 상대강도계수를 사용하고 T_A 설계법은 등치환산계수를 사용하고 있다.

투수성포장은 빗물을 표층, 기층을 통해 노상 아래로 침투시킬 수 있는 구조이어야 하기 때문에 표층과 기층에 사용되는 재료는 다공질 재료이어야 한다. 그러나 기존 설계법에서 다공질 재료에 대한 강도계수는 정의되어 있지 않다. T_A 설계법에서는 표층과 기층에 사용되

는 재료가 다공질이지만 고성능의 아스팔트를 사용하기 때문에 기존 포장 재료와 동일한 강도를 나타낼 수 있으며 투수성 및 배수성포장으로 설계를 할 때 동일한 강도계수를 적용하여 설계를 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 포장 단면을 설계하는데 사용되는 재료의 강도는 동일하다고 가정하고 우수 침투로 인한 노상 지지력의 약화로 노상에서의 요구되는 지지력을 산정하여 기존 단면에서의 지지력과 차이에 의한 보강 단면의 두께를 산정하였다.

4.2.2. 현재 설계법을 이용한 분석 결과

일본의 T_A 설계법에서는 표층과 기층에 사용되는 재료가 다공질이지만 고성능의 아스팔트를 사용하기 때문에 기존 포장 재료와 동일한 강도를 나타낼 수 있으며 투수성 및 배수성포장으로 설계를 할 때 동일한 강도계수를 적용하여 설계를 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 사용되는 재료의 강도는 동일하다고 가정하고 우수 침투로 인한 노상 지지력(CBR) 약화로 노상에서 요구되는 지지력을 산정하여 기존 단면에서의 지지력과 차이에 의한 보강 단면의 두께를 산정하였다.

AASHTO 설계법을 이용한 분석에서는 택지개발사업지구 실시 보고서에 따르면 노상의 CBR은 6.5이고 보조기층의 CBR은 50, 노상의 지지력 계수 SSV는 4.39이며 이 때 광로의 노상면에서의 소요 SN은 5.49이다. 이러한 조건에서 노상 CBR이 6.5에서 0.5씩 감소할 때 노상면에서 소요되는 SN을 산정하고 기존 SN에서 CBR 감소로 인해 증가된 SN을 보완할 수 있는 보조기층의 보강두께를 계산하였으며 그 결과는 표 6에 정리하였다.

표 6. AASHTO 설계법을 이용한 노상 CBR 변화에 따른 보조기층 보강두께(cm)

CBR	광 로		대로1류			대로2류			대로3류			
	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께
6.5			35			41			37			39
6		2	37		2	43		2	39		2	41
5.5		4	39		4	45		4	41		4	43
5		6	41		6	47		6	43		7	46
4.5	35	8	43	41	8	49	37	8	45	39	9	48
4		11	46		11	52		11	48		11	50
3.5		14	49		14	55		14	51		15	54
3		17	52		17	58		17	54		18	57

표 6의 분석결과에 따르면 AASHTO 설계법에서는 노상의 CBR값이 약 20%정도 감소하면 약 5~6cm의 보조기층의 증가가 필요한 것으로 나타났다. T_A 설계법을 이용한 분석에서는 분석 대상 구간의 노상 CBR과 노선별 장래교통량을 식 2를 이용하여 포장의 소요두께를 계산하고 노상 CBR이 6.5에서 0.5씩 감소할 때 포장의 소요두께를 계산하여 CBR 감소로 인하여 증가되는 소요두께를 등치환산계수를 이용하여 보조기층의 보강두께를 계산하였으며 이를 정리한 것이 표 7이다. 표 7에 의하면 노상의 강도가 20% 정도 저하하면 T_A 설계법에서는 약 12cm 보조기층의 증가가 필요한 것으로 나타났다.

표 7. T_A 설계법을 이용한 노상 CBR 변화에 따른 보조기층 보강두께(cm)

CBR	광 로			대로1류			대로2류			대로3류		
	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께	보조기층 두께	증가 두께	총보조기층 두께
6.5			35			41			37			39
6		4	39		4	45		4	41		4	43
5.5		8	43		8	49		7	44		8	47
5		12	47		12	53		12	49		12	51
4.5	35	18	53	41	17	58	37	17	54	39	18	57
4		24	59		23	64		23	60		24	63
3.5		31	66		30	71		29	66		31	70
3		40	75		39	80		38	75		39	78

노상의 포화에 의해 노상의 강도가 20% 저하된다고 가정하고 현재 사용하고 있는 포장설계법으로 설계를 하면 약 6~12cm의 보조기층 증가가 필요한 것으로 나타났다. 이것은 노상의 토질조건을 최악의 상태를 가정한 CBR값을 이용하기는 했지만, 포장의 공용자료를 근거로 한 것이기 때문에 노상의 포화상태가 반영되었다고 보기가 어렵다. 따라서 이 결과는 약간 과소평가된 것으로 판단된다.

4.3. 일본 투수성포장 설계 방법과의 비교

일본에서는 “도로노면 우수처리 매뉴얼(2005)”과 “투수성포장 가이드북(2007)”을 통해 내구성 및 우수유출 억제 성능 관점에서 투수성포장의 설계방법을 제시하고 있다. 포장의 설계조건으로 필요한 현장조건은 노상 지지력과 포장계획 교통량 및 노상, 원지반의 침투능력이다. 투수성포장의 종류는 대략 노상의 투수계수가 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 정도이면 노상 침투형을 선택하며 노상의 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 정도 이하라면 일시

저류형을 선정하는 것을 표준으로 한다. 노상의 투수계수가 $1 \times 10^{-3} \text{cm/s} \sim 1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ 정도를 만족하며 사질토의 노상인 경우 T_A 설계법에 따라 필요 등치환산 두께를 확보하도록 설계하며, 노상의 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 정도 이하이거나 점성토, 점성토를 안정처리 노상토에 노상 침투형의 투수성포장을 적용할 경우에는 내구성 확보를 위하여 포장두께를 증가하도록 하고 있다. 증가하는 포장두께는 아래 식(3)으로 구하며, 포장두께의 증가는 보조기층의 단면 두께에 포함시킨다.

$$h_a = 0.4 \times h_m + 7 \quad (3)$$

여기서, h_a : 증가하는 포장두께(cm)

h_m : T_A 법으로 포장을 설계한 경우의 포장 두께(cm)

택지개발사업지구의 포장 단면을 T_A 설계법으로 설계할 경우 포장두께와 지지력 저하로 인하여 내구성 확보를 위하여 증가해야 하는 두께는 아래 표 8과 같다. 노상의 약화로 증가되는 보조기층의 두께는 33~35cm 정도로 나타났다.

표 8. 일본 투수성포장 설계법에 의한 포장두께(cm)

구 분	현재 설계법에 의한 보조기층 두께(cm)	증가두께 (cm)	조정두께 (cm)
광 로	35	33	68
대로1류	41	35	76
대로2류	37	33	70
대로3류	39	35	74

투수성포장의 포장단면을 설계하기 위한 방안으로 투수성포장으로 설계할 경우 물의 침투로 인해 노상의 지지력이 약화된다고 가정하고 노상 지지력의 약화에 따라 유한요소 해석을 통하여 구조적 안정성을 확보할 수 있는 포장두께를 분석하였다. 또한 포장설계 개념에서 노상의 지지력 저하에 따른 포장두께의 보강방안과 보강두께를 분석하였으며 이를 정리하면 표 9와 같다.

택지개발사업 실시설계보고서의 단면구조에 따른 유한요소 해석결과, 노상의 지지력이 20% 저하될 때 빗물의 영향을 받지 않는 일반포장에 비해 노상의 변위량이 19% 증가하는 것으로 나타났으며 하중조건에 따라 31cm~32cm 정도 보조기층 두께를 증가해야 하는 것으로 분석되었다. 또한 노상지지력이 25% 정도 저하될 때

표 9. 분석결과와의 비교(cm)

구분	현재 설계법에 의한 보조기층 두께	유한요소 해석			AASHTO 설계법		T _A 설계법		일본 투수성 포장 설계법
		증가 두께	총 보 보조기층 두께	증가 두께	총 보 보조기층 두께	증가 두께	총 보 보조기층 두께		
광로	35	32	67	6	41	12	47	33	68
대로1류	41	31	72	6	47	12	53	35	76
대로2류	37	31	68	6	43	12	49	33	70
대로3류	39	31	70	7	46	12	51	35	74

* 유한요소해석 : 노상지지력 20% 저하 때의 증가 두께

* AASHTO, T_A 설계법 : CBR=5(노상지지력 20% 저하) 때의 두께

보강두께가 일본의 투수성포장 설계 개념의 증가두께와 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 노상의 조건이 가장 열악한 조건일 때는 유한요소분석 결과와 유사한 일본의 보조기층 증가방식을 채택하는 것이 안전할 것으로 판단된다.

5. 결론

투수성포장이 도시지역에서 발생하고 있는 도시 홍수, 열섬현상 등의 문제를 저감시킬 수 있는 방안 중 하나라는 점에서 외국에서는 차도 포장에 투수성포장을 적용하기 위한 연구가 수행되고 있지만 국내에서는 우수 침투로 인한 노상의 연약화를 우려하여 아직 관련 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 투수성포장에 대한 연구사례와 국내의 노상에 대한 연구의 검토를 통해 노상의 특성과 포화로 인한 강도저하를 검토하고, LH공사에서 시행한 택지개발사업지구의 기존 포장두께 설계 방법에 의해 설계된 단면을 투수성포장을 적용할 경우 투수성포장이 우수 침투로 노상이 연약화된다고 가정하고 약화된 만큼 포장두께를 얼마나 증가를 시켜야 기존 포장두께 설계 방법에 의한 단면과 동일한 구조적 안정성을 확보할 수 있는지를 유한요소 해석과 기존 포장두께 설계 개념에 따라 증가두께를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 국내에서는 노상재료로 우수한 재료가 사용되고 있으며 노상이 최적함수비에서 최대건조밀도의 95% 이상으로 다져지면 빗물침투로 인한 노상의 함수비 증가는 약 2%일 것으로 판단되고 이로 인해 노상의 탄성계수는 약 20% 저하될 수 있다는 것을 확인하였다. 여기서 중요한 것은 함수비의 변화는 20%가 넘을

수도 있으나 최적함수비와 최대함수비의 차이는 크지 않으며 한계가 있다는 점이다. 따라서 함수비 변화로 인한 노상의 지지력 변화는 제한적일 수밖에 없다는 점이다.

둘째, LH공사에서 시행한 택지개발사업지구의 기존 포장 설계 단면에 대해 빗물로 인한 노상의 강도 저하(20%)를 고려하여 유한요소해석으로 분석한 결과 보조기층의 두께를 약 31cm 증가가 필요하다는 결과를 얻었다. 그러나 유한요소해석에 의한 결과는 노상이 일년내내 포화되어 있다는 전제 하에 분석된 것이기 때문에 안전측일 수 있다.

셋째, 지금 국내에서 사용하고 있는 아스팔트포장 설계법에 노상의 강도(CBR)가 약화되는 개념을 적용하여 보조기층의 증가두께를 산정한 결과 6~12cm의 증가가 필요하다는 결과를 얻었다. 불투수성의 표층과 기층으로 구성된 기존의 설계법에서 공용되는 자료를 근거로 한 설계법이므로 노상이 포화되지 않은 현실적인 상황을 반영한다고 볼 수 있으므로 이것은 과소설계의 의미가 있다고 판단된다.

넷째, 일본에서는 노상의 투수계수가 $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 정도 이하의 점성토에 대해서 보조기층의 증가를 고려하고 양호한 노상에 대해서는 증가를 특별히 고려하지 않고 있다. 본 연구에서 얻은 유한요소를 이용한 결과가 일본에서 투수계수가 작은 노상에 적용되는 증가공식의 결과와 유사하게 나타났다.

따라서 노상의 토질조건이 투수가 잘되어 아주 양호할 경우, 기존의 설계법을 이용하는 것이 최소 설계두께가 되고, 노상의 토질조건이 좋지 않을 때는 일본의 보조기층 증가공식에 의한 두께가 최대 두께설계라는 점에 착안하면서 노상의 투수조건에 따라 설계를 하고, 투수성포장을 적용하는 구간에 대해 물의 침투로 인하여 노상 함수비 변화의 변동성, 함수비 변화에 따른 노상의 강도 특성을 노상토 종류별, 계절적 요인별 특성 등 점차 투수성포장의 시공실적을 늘려가면서 이의 적정성을 평가할 필요가 있다. 이러한 결과를 통해서 노상토, 노상 조건에 따른 노상강도의 저하 특성과 이러한 조건에서의 투수성포장의 공용성능 평가를 통해서 구조적 안정성을 확보할 수 있는 투수성 아스팔트포장의 두께 설계 방법을 확립할 필요가 있다.

투수성 아스팔트포장은 아스팔트포장의 기능을 다 하면서 포장을 통해 물과 공기가 통과되는 자연과 가장 닮은 포장으로서 안전, 환경 그리고 물순환을 크게 개선시키는 포장공법이다. 국민의 삶의 질과 직접 관련되는 이

러한 투수성포장의 적용을 보다 적극적으로 검토하여 현실적인 대안을 제시할 필요가 있다.

참고 문헌

권기철, 오명주(2006), "노상토의 변형특성에 대한 함수비 및 건조단위중량의 영향", *한국도로학회 논문집*, 제8권, 제2호, pp. 87-93

건설교통부(2002), "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 아스팔트 포장 설계법 개발", 1단계 1차년도 최종보고서

건설교통부(2007), "한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 설계입력 변수 정량화", 건설교통부, 2단계 4차년도 최종보고서

건설교통부·한국건설교통기술평가원(2007), "친환경 4S 포장시스템 개발 연구", 건설교통부·한국건설교통기술평가원

유인균(1988), "가요성포장 설계시 CBR값의 적용", *건설기술정보지*(1988.4), 한국건설기술연구원

최준성, 김수일(1999), "아스팔트 콘크리트 포장구조체의 현장온도 조건을 고려한 물성추정에 관한 연구", *한국도로학회 학술발표회 논문집* pp. 177-180

한국도로공사(1994), "고속도로 아스팔트 포장 설계법 개선에 관한 연구", 아스팔트포장연구실

한국도로교통협회(1997), "아스팔트포장 설계·시공요령", 한국도로교통협회

한국토지공사(2006), "광주수완지구 택지개발사업 실시설계보고서", 한국토지공사

National Research Council(1994), "Evaluation of the AASHTO Design Equation and Recommended Improvements", Strategic Highway Research Program, SHRP-P-394

遠藤桂, 野田悦郎, 竹内康(2002), "試験舗装による車道用透水性舗装のパフォーマンス", *舗装*

中西弘光, 淺野耕司, 川西札緒奈, 高砂武彦(2002), "環境に配慮した車道用透水性舗装の開発", *舗装*

日本土木研究所(2005), "道路路面雨水処理マニュアル", 日本土木研究所

日本道路協會 舗装委員會 舗装設計施工小委員會(2007), "透水性舗装ガイドブック 2007", 日本道路協會

吉中 保, 根本信行, 幸田正裕(2000), "透水性アスファルト舗装の車道への適用に関する検討", *土木學會舗装工學論文集* 第5卷, pp. 47-52

접 수 일 : 2011. 5. 16

심 사 일 : 2011. 5. 19

심사완료일 : 2011. 8. 9